



## Валидация кода STEG на экспериментах по гидродинамике горизонтального парогенератора<sup>1</sup>

Абди Х., Урегани Джафари Н., Мелихов В.И., Мелихов О.И.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Код STEG (STeam Generator) [1–3] разработан для моделирования теплогидравлических процессов в горизонтальном парогенераторе. Этот код использует нестационарную двухжидкостную трехмерную модель смеси воды и пара для моделирования теплогидравлических процессов. Валидация кода STEG была подтверждена по результатам нескольких экспериментов, но из-за сложности моделируемых теплогидравлических процессов и объектов все еще существует необходимость в валидации кода. В данной работе моделировались процессы по изучению гидравлики движения двухфазной среды применительно к условиям в парогенераторе с помощью кода STEG. При этом использовались данные комплексного экспериментального исследования, проведенного во Всероссийском теплотехническом институте (ВТИ) [4]. В частности, исследовались закономерности изменения объемного паросодержания и гидравлического сопротивления при поперечном обтекании

пучков труб. Расчеты проводились с помощью кода STEG для нескольких режимов с разными расходами воздуха, а также для ПДЛ с разными степенями перфорации. Результаты расчетов сравнивались с опытными данными и было получено хорошее согласие между ними.

### Краткое описание кода STEG

Математическая модель кода STEG основана на двухскоростной двухтемпературной модели двухфазного потока [5]. Каждая фаза (жидкость и пар/газ) рассматривается как отдельная непрерывная среда (континуум), для которой формулируются уравнения сохранения массы, импульса и энергии. Для описания взаимодействия фаз друг с другом и с окружающими конструкциями (стенка, трубчатка и т.п.) уравнения сохранения дополняются специальными членами, моделирующими эти взаимодействия. Поскольку рассматриваемые в данной статье экспериментальные исследования проводились при комнатной температуре (теплообмен между водой и воздухом отсутствовал), то для краткости уравнения сохранения энергии не приводятся.

В данной работе для определения межфазного сопротивления двухфазного потока в ТП используется корреляция межфазного сопротивления [6], полученная в результате анализа эксперименталь-

<sup>1</sup>Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00793

ных данных по течению двухфазной среды сквозь трубный пучок. В областях не занятых трубчаткой в [7] предложена модель межфазного сопротивления, в целом основанная на подходе Ишии-Зубера [8], но имеющая ряд отличий, вызванных особенностями течения двухфазной смеси в горизонтальном ПГ.

## Описание экспериментальной установки

Во Всероссийском теплотехническом институте была сооружена водовоздушная модель парогенератора, на которой изучалось движение двухфазной среды в условиях, характерных для натурального ПГ. Модель состояла из шахматного трубного пучка, погруженного дырчатого листа и опускающего канала, Рис. 1. Трубный пучок выполнен из труб диаметром  $16 \times 1.4$  мм, стали X18H10T и имел в высоту 57 рядов. В каждом ряду было установлено 10 труб. Геометрические характеристики и система дистанционирования ( $S_1 = 0.023$  м;  $S_2 = 0.019$  м) трубного пучка в модели были такими же, как и в натурном ПГВ-1000. Длина трубы в пучке 0.5 м. Расстояние от дырчатого листа до трубного пучка составляло 0.25 м, использовались четыре листа с различной перфорацией – 7.5% и 20%. Подвод воздуха осуществлялся в трех сечениях по высоте пучка труб через все 10 труб (перфорированных), находящихся в данном сечении, моделируя процесс парообразования. Расход воздуха, подаваемый в каждое сечение, мог изменяться в зависимости от программы исследований. Измерение объемного газосодержания проводилось методом  $\gamma$ -просвечивания. Помимо этого, измерялись перепады давления по высоте трубного пучка и уровни воды в модели и над ПДЛ.

Каждый эксперимент выполнялся при заданных нагрузке воздуха на зеркало испарения и уровне воды в модели.

## Анализ экспериментов кодом STEG

Были рассмотрены девять различных экспериментальных режимов, в шести из этих режимов использовался ПДЛ с перфорацией 7.5%, в трех – ПДЛ с перфорацией 20%. Каждый режим характеризовался тремя приведенными скоростями подачи воздуха в нижнем, среднем, верхнем сечениях ( $w''_{01}$ ,  $w''_{02}$ ,  $w''_{03}$ ) и весовым уровнем воды в сосуде (Н1). Приведенные скорости подачи воздуха определялись как отношение расхода воздуха к площади проходного сечения над ПДЛ.

Количественное сравнение расчетных и экспериментальных данных включало в себя следующие параметры: 1) объемное паросодержание в трех

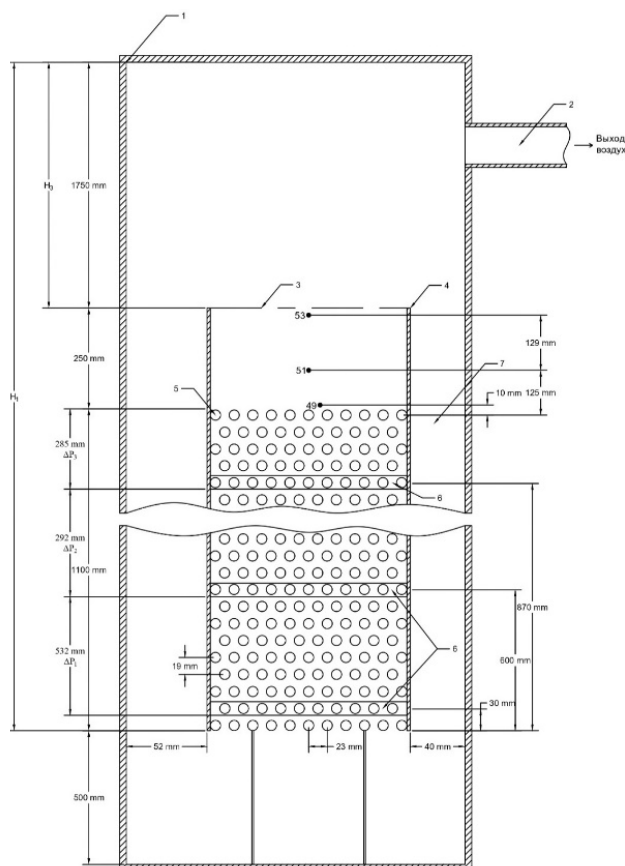


Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 – корпус; 2 – патрубок отвода воздуха; 3 – дырчатый лист; 4 – закраина; 5 – трубный пучок; 6 – подвод воздуха; 7 – опускающий канал. Измерения: 49, 51, 53 – объемное воздухосодержание, Н1, Н3 – весовой уровень воды,  $\Delta P_1$ ,  $\Delta P_2$ ,  $\Delta P_3$  – перепады давления

точках ( $\Phi_{49}$ ,  $\Phi_{51}$  и  $\Phi_{53}$ ), расположенных между трубным пучком и ПДЛ; 2) три перепада давления ( $\Delta P_1$ ,  $\Delta P_2$  и  $\Delta P_3$ ) по высоте трубного пучка и 3) уровень воды над ПДЛ (Н3).

На Рис. ?? показано сравнение результатов расчета уровня воды над ПДЛ, объемного воздухосодержания и потерь давления в трубном пучке с экспериментальными данными для всех девяти режимов. Пунктиром изображены линии показывающие относительную погрешность  $\pm 10\%$  между расчетными и экспериментальными значениями.

Значения, полученные в расчетах кодом STEG, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Относительные погрешности расчета для всех девяти экспериментальных режимов не превышают 10%.

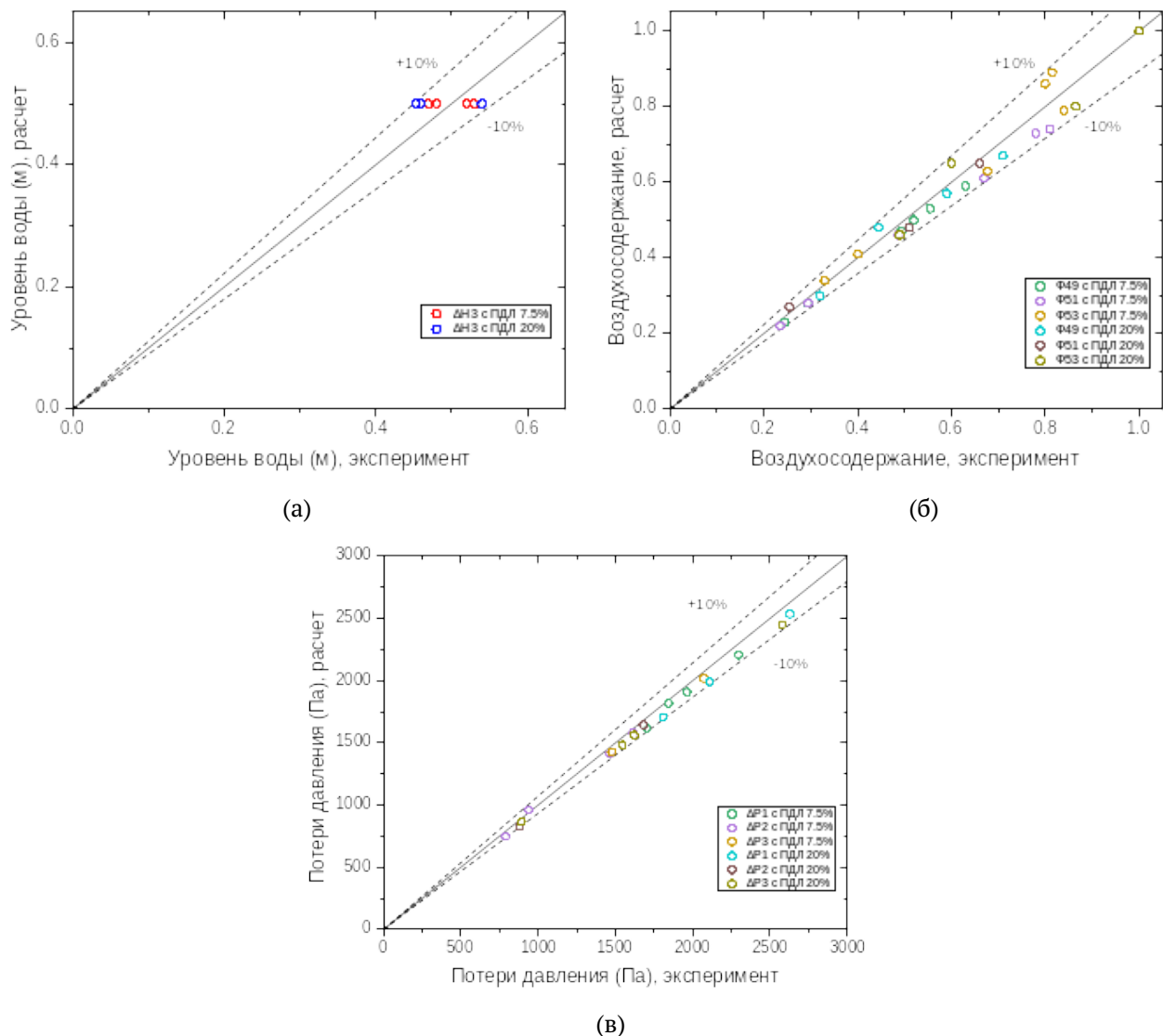


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и расчетных данных для всех 9 режимов. а) уровень воды над ПДЛ, б) объемное воздуходоержание, в) потери давления

## Список литературы

- [1] Мелихов О.И., Мелихов В.И., Парфенов Ю.В. Математическое моделирование теплогидравлических процессов в горизонтальном парогенераторе с помощью кода STEG // Новое в российской электроэнергетике. 2008. № 8. С. 21–33.
- [2] Le T.T., Melikhov V.I., Melikhov O.I., Nerovnov A.A., Nikonov S.M. Validation of the STEG code using PGV experiments on hydrodynamics of horizontal steam generator // Nuclear Engineering and Design. 2020. V. 356. p. 110380.
- [3] Liu S., Yin F., Melikhov V.I., Melikhov O.I. Validation of the STEG code using experiments on two-phase flow across horizontal tube bundles // Nuclear Engineering and Design. 2022. V. 399. p.112048.
- [4] Колбасников А.В. Разработка методов расчета гидродинамики двухфазной среды и теплообмена в попережноомываемых поверхностях нагрева парогенераторов на основе экспериментальных исследований // Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. 2000. ОАО ВТИ. 216 с.
- [5] Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. М.: Наука. 1987.
- [6] Simovic Z.R., Ocokoljic S., Stefanovic V.D Interfacial friction correlations for the two-phase flow across tube bundles // International Journal of Multiphase Flow. 2007. V. 33 (2). p. 217–226.
- [7] Le T.T., Melikhov V.I., Melikhov O.I. Recommended set of interfacial drag correlations for the two-phase flow under thermal–hydraulic conditions of a horizontal steam generator // Nuclear Engineering and Design. 2021. V. 379. p.111249.
- [8] Ishii M., Zuber N. Drag coefficient and relative velocity in bubbly, droplet or particulate flows // AIChE J. 1979. V. 25(5). p. 843–855.